

Ökologische Betrachtungen zur Dauerhaftigkeit eines Stahlbetonbauteils

C. Haag, A. Gerdes, T. Künniger*, K. Richter* und F.H. Wittmann

Institut für Baustoffe, ETH Zürich

* EMPA Dübendorf, Schweiz

Zusammenfassung

Der Lebenszyklus eines Stahlbetonbrückenpfeilers ist auf die Prozesse Herstellung, Instandsetzung, Abbruch und Entsorgung beschränkt. Um die Dauerhaftigkeit zu steigern, werden Massnahmen wie eine sorgfältige Nachbehandlung der Betonoberfläche oder der Einsatz von Betonzusatzmitteln angewandt. Dadurch lässt sich die Lebensdauer eines Bauwerks verlängern und die Wahrscheinlichkeit einer Instandsetzung während der Nutzungsphase reduzieren.

Eine Werkstoffeigenschaft, die im Hochbau massgeblich die Lebensdauer eines Stahlbetonbauteils bestimmt, ist der Carbonatisierungswiderstand. Über Literaturwerte kann der Einfluss der Parameter w/z-Wert, Nachbehandlung und Betonüberdeckung auf die Lebensdauer beispielsweise eines überdachten carbonatisierenden Bauteiles erfasst werden. Ist die Lebensdauer geringer als die festgesetzte Nutzungsphase, so wird eine Instandsetzung innerhalb des Lebenszyklus eines Bauwerks notwendig. Unter Einbeziehung der verlängerten Lebensdauer infolge einer hinreichenden Nachbehandlung oder des Einsatzes von Verflüssigern aber unter gleichzeitiger Berücksichtigung der erhöhten Umweltbelastung bei der Herstellung sind die unterschiedlichen Lebenszyklen eines Stahlbetonbrückenpfeilers erarbeitet worden. Für diese Lebenszyklen sind die Stoff- und Energieflüsse und die daraus entstehenden ökologischen Auswirkungen erfasst worden.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den geringen Aufwand einer sorgfältigen Nachbehandlung sich das Risiko einer Instandsetzung wesentlich reduzieren lässt. Der Einsatz von Verflüssigern führt zu einem merklichen Anstieg der Umweltbelastungen bei der Pfeilerherstellung führt. Im Hinblick auf die deutlichen

Umweltbelastungen bei der Instandsetzung ist der Einsatz von aufwendig hergestellten Verflüssigern bei der Erstellung eines Bauteils wegen des damit verbundenen Anstieges des Carbonatisierungswiderstandes demnach ökologisch sinnvoll. Die Gewährleistung einer genügenden Betonüberdeckung über der Bewehrung wirkt sich auf die Lebensdauer und daher auf die Umweltbeeinflussung positiv aus. Sowohl die Wahl der Instandsetzungsmassnahme selber als auch die Wahl der Art der Energieproduktion beeinflusst die Umweltbelastung infolge einer Instandsetzung deutlich.

Stichwörter: Ökobilanz, Dauerhaftigkeit, Instandsetzung, Carbonatisierung, Betonverflüssiger

Ecological considerations concerning durability of a reinforced concrete structural member

Summary

The life cycle of a structural element can be limited to the following stages: production, repair and restoration, demolishing and final storage. In order to increase the durability careful curing of the young concrete surfaces and the use of admixtures are common means. In this way the life-time of a structure can be increased and the probability of repair measures during the planned service-life can be decreased.

The resistance with respect to carbonation is one decisive material property which influences directly the life-time of a reinforced concrete element. Based on data from the literature the influence of w/c-ratio, curing conditions and thickness of concrete cover on the life-time can be estimated. If the expected life-time is shorter than the planned service-life of a structure repair measures have to be taken into consideration. In this paper the ecological impact of a structural element such as a column of a bridge has been determined. The beneficial effect of appropriate curing and the use of water reducing admixtures on the expected life-time on the one side and the ecological risk of concrete admixtures on the other have been taken into consideration.

Results show that effective curing measures reduce the risk of unavoidable repair strongly with comparatively small effort. The use of a water reducing admixture increases the ecological load in the first place. But the use of admixtures is still ecologically meaningful because the high quality concrete produced in this way avoids energy intensive repair measures. The achievement of an appropriate thickness of the concrete cover has also a positive influence on the global ecological balance. It is shown that the choice of the most suitable repair measure and the form of energy involved have a strong influence on the ecological impact. It

can be concluded that a comprehensive ecological assessment is necessary in order to be able to determine the ecological impact of different parameters.

Keywords: Life Cycle Assessment, Durability, Renovation, Carbonation, Superplasticizer



Prof. Dr. F.H. Wittmann, WTA-Mitglied, studierte zunächst an den Universitäten Karlsruhe und München Physik, 1969 habilitierte er bei Prof. H. Rüschi an der TU München. Seit 1976 ist er ordentlicher Professor für Werkstoffe des Bauwesens, zuerst in Delft, dann in Lausanne und heute an der ETH in Zürich. Er befasst sich vorwiegend mit Fragen der Dauerhaftigkeit zementgebundener Werkstoffe und der Anwendung der Bruchmechanik im Bauwesen.



A. Gerdes, WTA-Mitglied, Studium der Chemie an der TU Clausthal. Diplomarbeit am Institut für Baustoffe der TU Clausthal über die Synthese und das Hydrationsverhalten von Calciumgermanaten. Seit 1990 Mitarbeiter am Institut für Baustoffe der ETH Zürich. Hauptarbeitsgebiete sind die Dauerhaftigkeit zementgebundener Werkstoffe sowie die Verwendung von aufbereiteten Abfallstoffen in Werkstoffen des Bauwesens.



Dr. Klaus Richter, Studium der Holzwirtschaft an der Universität Hamburg, Wissenschaftliche Mitarbeit in DFG-Projekten, u.a. zweijähriger Forschungsaufenthalt am spanischen Holzforschungsinstitut in Madrid. Promotion zum Dr. rer. nat. Seit 1987 wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Holz der EMPA Dübendorf, Arbeitsgebiete Holzwissenschaft, Holztechnologie, Holzverwendung sowie ökologische Beurteilung von Bauprodukten. Von 1992 bis 1993 Gastwissenschaftler am USDA Forest Products Laboratory in Madison, Wi



C. Haag, Studium an der Abteilung für Bauingenieurwesen der ETH Zürich. Diplomarbeit am Institut für Baustoffe der ETH Zürich über den Einfluss der Dauerhaftigkeit eines Stahlbetonbauteils auf die Ökologie. Derzeit beschäftigt mit den Auswirkungen auf die Umwelt durch eine Hydrophobierung.



T. Künniger, Studium der Holz- und Faserwerkstofftechnik an der Technischen Universität Dresden mit Abschluss als Dipl. Ing. Holztechnik. Seit 1993 wissenschaftliche Mitarbeiterin der Abteilung Holz der EMPA Dübendorf (Schweiz) mit dem Arbeitsschwerpunkt: Ökologische Bewertung von Bauprodukten.

1 Einleitung

Auf Bauwerke aus Stahlbeton wirken häufig äussere Einflüsse wie aggressive Wässer, Tausalz und Kohlendioxid ein, die zur Zerstörung der Bausubstanz führen können. Der Widerstand gegen diese äussere Einflüsse ist massgebend für die Lebensdauer eines Stahlbetonbauteils. Durch betontechnologische Massnahmen, wie der gezielte Einsatz von Betonzusatzmitteln, kann beispielsweise der Widerstand gegen Carbonatisieren verbessert und so die Lebensdauer eines Bauteils verlängert werden. Der Einsatz solcher Betonzusatzmittel hat jedoch infolge des steigenden Umweltbewusstseins in den Industriestaaten intensive Diskussionen bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit ausgelöst.

Die praktische Auswirkung dieser ökologischen Aspekte zeigt sich am Beispiel der Stadt Zürich, wo in den Ausschreibungsrichtlinien der Einsatz von Betonverflüssigern aus ökologischen Gründen reglementiert wurde. Derzeit werden in den Diskussionen über ökologische Fragen zum Betonverflüssiger unterschiedliche Aspekte intensiv diskutiert. Ein Teilaspekt ist das Auswaschen des Betonverflüssigers aus dem Festbeton und die damit verbundenen Umweltbelastungen [1]. Ein Schwerpunkt wird auf das zukünftig vermehrt zur Anwendung kommende Recycling von mit Verflüssiger hergestelltem Beton gesetzt. Vor allem das aus der Anreicherung von Verflüssiger in recyceltem Beton sich ergebende Gefährdungspotential ist Gegenstand derzeitiger Untersuchungen. Bisherige Ergebnisse haben gezeigt, dass bei unterschiedlichen Bedingungen die Mobilität der Verflüssiger und deren Abbauprodukt gering ist. Die Freisetzungsrates ist nach [2] selbst bei konservativen Annahmen sowohl bei der Betonherstellung als auch bei einem Recycling von Beton so niedrig, dass die in die Umwelt abgegebenen Schadstoffe selbst auf lokaler Ebene mindestens eine Grössenordnung unter den gesetzlichen Grenzwerten liegen.

Nach diesen Betrachtungen wird ausschliesslich die toxikologische Wirkung des Betonverflüssigers erfasst, aber nicht die materialtechnologische und ökologische Wirkung des Verflüssigers als Betonzusatzmittel auf die Lebensdauer eines Stahlbetonbauteils. Diese Aspekte können mit einer sogenannten Ökobilanz berücksichtigt werden. Es handelt sich hierbei um eine Methode zur ökologischen Bewertung von Produkten, die den gesamten Lebenszyklus erfasst. Dieser Lebenszyklus setzt sich bei einem Stahlbetonbauwerk zusammen aus der Bereitstellung der Rohstoffe (z.B. Zement, Verflüssiger und Zuschläge), der Herstellung, Nutzung, eventuellen Instandsetzung sowie dem Abbruch des Bauteils und der Entsorgung der Reststoffe. Im Rahmen einer Ökobilanz werden über diesen Lebenszyklus der Energie- und Stoffverbrauch sowie die anfallenden Schadstoffemissionen erfasst und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt, wie z.B. auf den Treibhauseffekt, abgeschätzt.

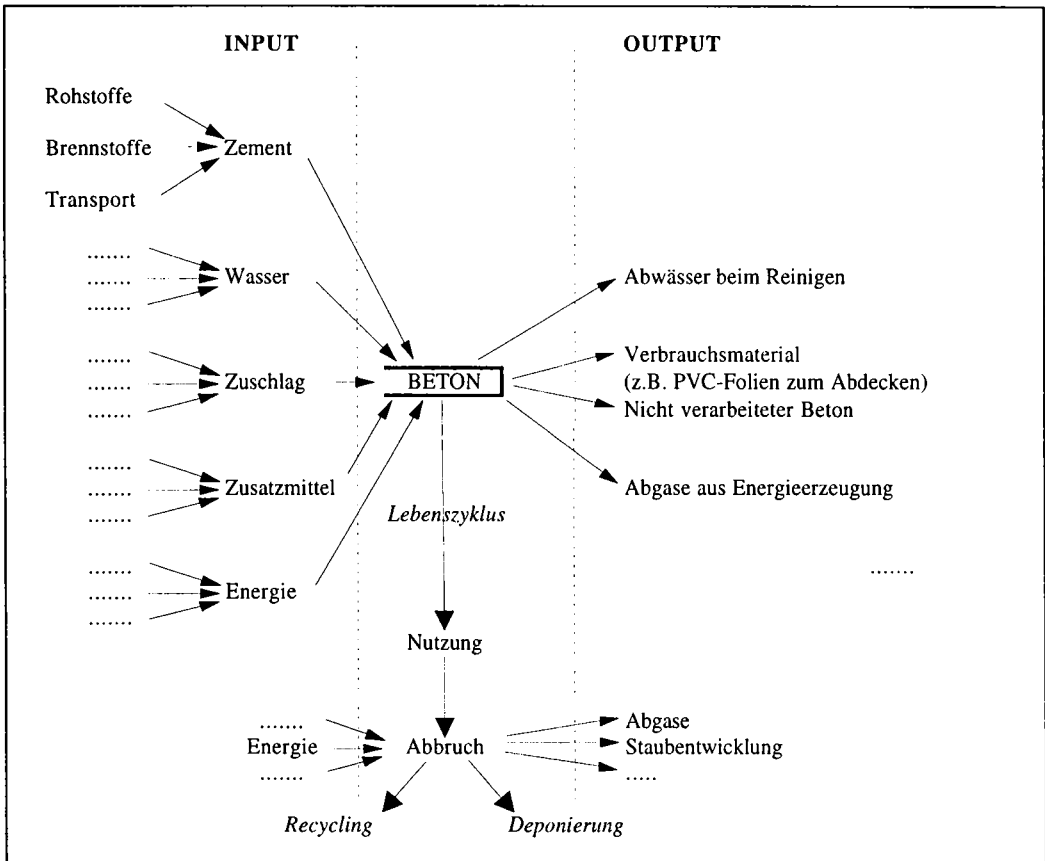


Bild 1: Schematische Darstellung einer Sachbilanz

Ziel dieser Studie ist es daher, bei der Erstellung einer Ökobilanz für Beton, hergestellt mit oder ohne Verflüssiger, den gesamten Lebenszyklus zu erfassen und Faktoren, die die Lebensdauer massgeblich beeinflussen, in die ökologischen Betrachtungen miteinzubeziehen. Zu den hier berücksichtigten Faktoren zählen einerseits eine ausreichende Nachbehandlung sowie die Gewährleistung einer genügenden Betonüberdeckung über der Bewehrung. Weiterhin wurden die bei einer vorzeitigen Instandsetzung anfallenden Stoff- und Energieflüsse in die Bilanzierung miteinbezogen.

2 Ökobilanz

2.1 Zum Begriff Ökobilanz

Die Ökobilanz ist eine Methode zur Erfassung der ökologischen Auswirkungen von Produkten und Prozessen. Sie betrachtet den gesamten Lebenszyklus eines

Umweltauswirkung	Vergleichseinheit
Treibhauseffekt (Globale Erwärmung)	CO ₂ -Äquivalent [kg]
Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre	CFC-11-Äquivalent [kg]
Humantoxizität	Grenzwerte[kg]
Ökotoxizität	Grenzwerte[kg]
Photochemisches Ozonerzeugungspotential (Smogbildung)	C ₂ H ₂ -Äquivalent [kg]
Versauerung (i.d.R. der Böden, durch sauren Regen)	SO ₂ -Äquivalent [kg]
Eutrophierung (Überdüngung i.d.R. der Oberflächengewässer)	PO ₄ ³⁻ -Äquivalent [kg]
Energie (Graue Energie der Stoffe sowie Prozessenergie inkl. Abwärme)	MJ

Tabelle 1: Liste der berücksichtigten Wirkungskategorien

Produktes, ausgehend von der Gewinnung und Verarbeitung der Rohstoffe bis zur Nutzung und Entsorgung des Produktes.

Über diesen Lebenszyklus wird sowohl der vom Produktionsprozess als auch der von den einzelnen Stoffen bedingte Energieverbrauch (inkl. der Energie zur Aufbereitung der Stoffe sowie zur Herstellung der Infrastruktur) und Schadstoffeintrag in die Medien Luft, Boden und Wasser ermittelt. Die Ökobilanz ist also eine quantitative Input/Output-Analyse, die den gesamten Lebenszyklus eines Produktes umfasst, wobei Rohstoffe und Energie dem Input, Haupt- und Nebenprodukte dem Output der Bilanz entsprechen.

Der Energie- und Stoffverbrauch sowie die im Laufe des Lebenszyklus eines Objektes anfallenden Emissionen werden anschliessend gemäss ihrer Auswirkungen auf die Umwelt beurteilt.

2.2 Systematik der Ökobilanz

Um sie übersichtlicher zu gestalten, wird die Ökobilanz in 4 Schritte unterteilt.

In der Zieldefinition wird der Bilanzraum zeitlich, örtlich und sachlich festgelegt. Handelt es sich bei diesem Objekt beispielsweise um einen Brückenpfeiler aus Stahlbeton (sachliche Abgrenzung), so kann als zeitliche Abgrenzung die Nutzungsdauer des Bauwerks angesetzt werden. Örtlich oder geographisch gesehen kann man die Betrachtungen auf den Raum Schweiz beziehen, so dass etwa die klimatischen Bedingungen, aber auch die politischen Randbedingungen direkt oder indirekt in die ökologischen Untersuchungen einfließen.

Bei der anschliessenden Systemabgrenzung werden die in die Ökobilanz einbezogenen Phasen des Lebenszyklus aufgeführt. Bei einem Bauteil können diese Phasen Herstellung, Nutzung, Instandsetzung und Entsorgung der Bausubstanz sein. Für die Phase der Entsorgung wird gewöhnlich ein Entsorgungsmodell angegeben, das berücksichtigt, zu welchem Anteil das Abbruchmaterial deponiert, recycelt oder verbrannt wird. In einem ähnlichen Modell, dem Energiemodell, wird die angenommene Art der Stromproduktion angegeben. Dieses Modell

ist für sämtliche Phasen des Lebenszyklus von Bedeutung, da es die Umwelteinwirkungen deutlich beeinflusst. So ist beispielsweise die Stromerzeugung durch Verbrennung fossiler Rohstoffe im Vergleich mit einer Energiegewinnung durch Nutzung der Wasserkraft mit erheblichen Emissionen an Gasen verbunden.

In dem nächsten Schritt, der Sachbilanz, geht es um die eigentliche Datenerhebung und -erfassung. Dabei werden auf der Input-Seite die Stoffe und Energie, auf der Output-Seite die Produkte und Nebenprodukte sowie die anfallenden Emissionen (d.h. sowohl gasförmige oder flüchtige Schadstoffe als auch Abwärme) berücksichtigt. In Bild 1 ist ein Beispiel zu einer Sachbilanz schematisch dargestellt.

Die Datenerhebung sollte so vollständig wie möglich sein. Hier trifft man jedoch schnell auf das Problem der infiniten Regression: Für jeden eingesetzten Stoff müsste der gesamte Lebenszyklus der Geräte mit den beispielsweise zu ihrer Produktion und Wartung nötigen Stoff- und Energieflüssen aufgeführt werden. Um die Datenerhebung mit angemessenem Aufwand durchführen zu können, muss also zwischen relevanten und irrelevanten Prozessen unterschieden werden. Die Wahl der berücksichtigten Prozesse ist genau anzugeben. Die Sachbilanz stellt also eine *sachliche* Aufzählung der Stoff- und Energieflüsse dar, die ohne jegliche Bewertung sämtliche Einflüsse über den gesamten Produktlebenszyklus erfasst.

Der dritte Schritt der Ökobilanz ist die Wirkungsbilanz. In der Wirkungsbilanz sollen die Umweltauswirkungen der mit dem Produktlebenszyklus verbundenen Emissionen aus der Sachbilanz qualitativ bzw. quantitativ ohne jegliche Wertung erfasst werden. Konkret handelt es sich bei der Wirkungsbilanz um eine Auflistung der infolge der Ergebnisse der Sachbilanz zu erwartenden Luft-, Wasser- und Bodenbelastung durch Schadstoffe. Diese Studie beruht auf dem Modell des Centrum voor Milieukunde Leiden (CML), in dem Faktoren (oder Wirkungskategorien) wie Ressourcennutzung, Ozonabbau, Treibhauseffekt, Human- und Ökotoxizität, Versauerung von Gewässern und Böden, Abfall, Abwärme und Strahlung, Flächenbelegung, Lärm, Geruch, Eutrophierung (Überdüngung) der Gewässer, Bildung von Photooxidanten, Gesundheitsgefährdung am Arbeitsplatz, Beeinträchtigung der Naturschönheit und der Artenvielfalt miteinbezogen werden können.

Die Emissionen, die bei einem Prozess anfallen, werden in diesem Modell zunächst einmal nach ihren Umwelteinwirkungen in diese unterschiedlichen Wirkungskategorien eingeordnet. Man spricht von einer *Klassifizierung* der Emissionen. Dabei kann eine Substanz auch mehreren Wirkungskategorien zugeordnet werden. Innerhalb dieser Wirkungskategorien wird die Wirkung der Menge eines emittierten Stoffes erfasst. Man spricht von der *Abschätzung* der Umweltauswir-

kung von Emissionen. Dabei wird die Umweltbeeinträchtigung durch das Freisetzen eines Stoffes nicht direkt erfasst, sondern man rechnet die Wirkung der freigesetzten Stoffmengen um auf einen Referenzstoff. Die Umweltauswirkung wird also nicht erfasst anhand der bei einem Prozess anfallenden Emissionen, sondern anhand der Menge eines Vergleichsstoffes, die für die betrachtete Wirkungskategorie die gleichen Umweltbeeinträchtigungen mit sich bringt. Die Menge des Referenzstoffes stellt das sogenannte Wirkungspotential dar.

$$WP = \sum_i SWP_i \cdot m_i \quad (1)$$

WP: Wirkungspotential [kg/Bezugseinheit]

SWP_i : spezifisches Wirkungspotential einer Substanz i [kg/kg]

m_i : Fracht der Substanz i [kg/Bezugseinheit]

Das spezifische Wirkungspotential eines Stoffes i gibt an, wieviel kg eines Referenzstoffes die gleiche Wirkung haben wie ein kg des Stoffes i .

In dieser Studie wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Wirkungskategorien mit den jeweiligen Referenzstoffen berücksichtigt. Zu der Kategorie Humantoxizität ist zu bemerken, dass die Daten auf Grenzwerten beruhen, die aus toxikologischen Versuchen ermittelt wurden. Die Versuche bezüglich der gesundheitlichen Gefährdung des Menschen sind schwer auszuwerten, da die Anfälligkeit der einzelnen Individuen auf die spezifischen Stoffe sehr unterschiedlich sein kann. Für die Abschätzung der Grösse Ökotoxizität wurde ebenfalls auf Grenzwerte zurückgegriffen, die oftmals eher einen politischen Ursprung haben, als dass sie auf wissenschaftlich fundierten Daten basieren. Mit der Handhabung dieser Grössen sollte man deswegen vorsichtig sein. Auf eine Erfassung der toxikologischen Werte im Rahmen der Wirkungsbilanz sollte jedoch nicht verzichtet werden, da sie die Menschen am ehesten betreffen und so rasch ins menschliche Bewusstsein eingehen. Daher stellen sie (insbesondere bezüglich des Verflüssigers) oftmals die massgeblichen Faktoren der ökologischen Diskussionen dar.

Der vierte und letzte Schritt einer Ökobilanz ist die Bewertung. Für eine Studie, die mit der Wirkungsbilanz des CML Leiden [3] erstellt worden ist, ist noch keine ausgearbeitete Bewertungsmethode vorhanden. Die Wirkungsbilanz selber gibt eine Fülle an Informationen, aber die Einstufung der Gefährdung der Umwelt durch die einzelnen Auswirkungen ist nur sehr schwer abzuschätzen und sollte nur von Umweltexperten vorgenommen werden. Die einzelnen Wirkungskategorien sind nicht untereinander vergleichbar, was eine Bewertung deutlich erschwert, wenn die Ergebnisse der Wirkungsbilanz nicht eindeutige und globale Vorteile eines Produktes aufzeigen.

2.3 Ziel der Ökobilanz

Die Ökobilanz erlaubt es, im Baubereich die unterschiedlichen Werkstoffe und Verfahren bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit zu vergleichen und zu optimieren. Durch die Betrachtung der einzelnen Prozesse im Lebenszyklus eines Bauwerks wird es möglich, die ökologischen Schwachstellen offenzulegen und zu verbessern.

Gesamthaft betrachtet erlaubt es die Ökobilanz in ihrer heutigen Form jedoch noch nicht, die Umwelteinflüsse infolge des Standorts oder der Geometrie eines Bauwerks, wie etwa lokale Temperaturveränderungen, Windschatten oder den Einfluss auf den Wasserhaushalt, zu berücksichtigen. Derzeit wird an Modellen gearbeitet, welche diese im Bauwesen sehr wichtigen Aspekte in die ökologische Bewertung miteinbeziehen [4].

Für diese Studie, die sich ausschliesslich mit der Optimierung der Verfahren sowie der Werkstoffe und Werkstoffeigenschaften auseinandersetzt, ist die Methodik der Ökobilanz durchaus geeignet. Eine in dieser Studie insbesondere in die ökologische Bewertung einbezogene Werkstoffeigenschaft ist die Dauerhaftigkeit, auf die im folgenden weiter eingegangen wird.

3 Dauerhaftigkeit und Ökobilanz

Die Dauerhaftigkeit eines Bauteils ist abhängig von der Beständigkeit des betreffenden Werkstoffes gegenüber unterschiedlichen Schadensmechanismen. Ein solcher Schadensmechanismus ist im Stahlbeton, neben dem Eindringen von Chloriden oder dem Angriff durch aggressive Wässer, das Carbonatisieren. Bei Aussenbauteilen und insbesondere im Hochbau ist das Carbonatisieren der häufigste Mechanismus, der zur Bewehrungskorrosion führt [5]. Im folgenden soll deshalb genauer auf diese Zusammenhänge eingegangen werden.

Aussenbauteile sind dem oberflächigen Angriff durch das Kohlendioxid der Luft ausgesetzt. Das Kohlendioxid dringt durch Diffusion in das Porengefüge der Zementsteinmatrix ein und reagiert anschliessend in Gegenwart von Wasser mit den darin gelösten Alkalihydroxiden, hauptsächlich mit Calciumhydroxid, unter Bildung von Carbonaten. Durch diese Reaktion sinkt der pH-Wert der Porenlösung von etwa 12.5 bis unter 9.5 ab. Die Eindringtiefe des Kohlendioxids in den porösen Zementstein bezeichnet man als Carbonatisierungsfront. Erreicht die Carbonatisierungsfront die Stahlbewehrung, so wird die bei pH-Werten über 10 gewährleistete Passivierung des Stahls aufgehoben. Eine Korrosion der Bewehrung wird möglich. Die Carbonatisierungsgeschwindigkeit ist massgeblich von der Verfügbarkeit von Kohlendioxid im Inneren und daher vom Diffusionskoeffi-

zienten des Betons bezüglich des Kohlendioxids abhängig. Man spricht von einem diffusionskontrollierten Prozess. Das unter dem Begriff des «Wurzel-t-Gesetz» bekannte Diffusionsgesetz, das Carbonatisierungsgesetz, beruht auf der Annahme einer CO_2 -Diffusion durch den bereits carbonatisierten Beton. Es wird durch das 1.Fick'sche Gesetz beschrieben :

$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot C_1}{C_2}} \cdot t = k \sqrt{t} \quad (2)$$

x: Carbonatisierungstiefe [m]

D: Diffusionskoeffizient von CO_2 für carbonatisierten Beton [m^2/s]

(abhängig vom Feuchtegehalt und der Porosität des Betons)

C_1 : CO_2 -Konzentration in der umgebenden Atmosphäre [kg/m^3] (0.6-0.8 g/m^3)

C_2 : benötigte Menge an CO_2 zur vollständigen Carbonatisierung von 1 m^3 Beton abhängig von der Art des Zementes, und dessen alkalischen Bestandteilen [kg/m^3] (10-50 kg/m^3)

t: Zeit [s]

k: Carbonatisierungskoeffizient [$\text{m}/\text{s}^{0.5}$]

Im folgenden werden die Einflussgrößen aufgeführt, die sich spezifisch auf die Diffusionsgeschwindigkeit des Kohlendioxids im Beton auswirken.

- Feuchtegehalt und klimatische Bedingungen:

Tabelle 2: Abschätzung der Lebensdauer aus Literaturdaten ([8],[9])

	w/z	k[$\text{m}/\text{s}^{0.5}$]	Lebensdauer [Jahre]	
			Betonüberdeckung 2 cm	Betonüberdeckung 3 cm
Referenzprobekörper ¹	0.45	1.33	>150	>150
Überdacht im Freien	0.45	1.42	>150	>150
Nachbehandelt ²	0.45	1.00	>150	>150
Referenzprobekörper ¹	0.55	2.86	76	150
Überdacht im Freien	0.55	3.06	67	131
Nachbehandelt ²	0.55	2.30	119	>150

¹: Mittelwert über Betone mit unterschiedlichen Typen PC, Zementgehalt nicht angegeben

²: 1 Tag in Schalung, 3 Tage nachbehandelt

Die optimale Luftfeuchte liegt für das Carbonatisieren zwischen 50 und 70 %. Ist der Beton zu feucht, oder ist er zu trocken, so fällt der Diffusionskoeffizient stark ab. Bei einer direkten Bewitterung durch Niederschlag kann das Diffusionsgesetz wegen der stark variierenden Betonfeuchte in der Randzone und dem daher sehr veränderlichen Diffusionskoeffizienten nicht direkt angewendet werden.

- Nachbehandlung

An der geschalteten Oberfläche ist der Anteil an Zementstein bedeutend höher als im Kernbeton. Daher ist der Beton in der Randzone auch poröser als weiter im Inneren des Bauteils. Trocknet der junge Beton nach dem Betonieren oberflächlich rasch aus, so wird die Hydratation des Zementes in der Randzone beeinträchtigt und die Porosität zusätzlich erhöht. Daraus folgt ein höherer Diffusionskoeffizienten und daher auch eine schnellere Carbonatisierung des Randbetons.

Eine Nachbehandlung des frisch eingebrachten Betons optimiert den Hydratationsgrad der Randzone, die daher eine im Vergleich zur unbehandelten Betonoberfläche stark verbesserte Betonqualität aufzeigt. Eine solche Nachbehandlung kann darin bestehen, dass der Beton beispielsweise später ausgeschalt oder nach dem Ausschalen mit Wasser berieselt wird.

- Wasser/Zement-Wert (w/z-Wert)

Die Menge an zugegebenem Anmachwasser hat einen bedeutenden Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften bezüglich der Dauerhaftigkeit. Je weniger Wasser man verwendet, desto kompakter und dichter wird der Zementstein. Wird der Beton mit einem zu hohen w/z-Wert hergestellt, so bleibt das überschüssige Wasser im Zementstein und bildet dort Kapillarporen. Diese Kapillarporen bestimmen die Transportvorgänge im Beton und sind massgebend für das Eindringen von Schadstoffen in ein Bauteil [6].

Wegen der besseren Verarbeitbarkeit werden in der Praxis oft Betone mit w/z-Werten von 0.5 bis 0.6 hergestellt. Um bei gleichbleibender Verarbeitbarkeit den w/z-Wert herabzusetzen und somit die Dichtigkeit des Zementsteins zu erhöhen sowie die Dauerhaftigkeit zu verbessern, bietet sich die Zugabe von Verflüssigern zum Frischbeton an. Betonverflüssiger dienen bei geringer Dosierung (0.1 bis 2.0 M.-% bezogen auf das Zementgewicht) zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons. Sie erleichtern also bei gleichbleibendem w/z-Wert das Einbringen des Betons. Gleichzeitig werden sie jedoch verwendet, um gezielt bei gleichbleibender Konsistenz den w/z-Wert senken zu können [7].

Neben diesen Einflussgrößen bezüglich der Diffusionsgeschwindigkeit von Kohlendioxid in den Beton sind technische Massnahmen wie etwa die Sicherstel-

lung einer ausreichenden Betonüberdeckung bestimmend für die Lebensdauer eines Bauteils.

4 Problemstellung

Ziel dieser Studie ist es, den Mehraufwand bei der Herstellung eines Pfeilers aus Stahlbeton, der durch Massnahmen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit entsteht, mit dem Aufwand einer Instandsetzung zu vergleichen. Unter Berücksichtigung der verlängerten Lebensdauer wird abgeschätzt, ob die betrachteten Massnahmen ökologisch sinnvoll sind.

5 Beschreibung des Bauteils

Gewählt wird hier ein Brückenpfeiler mit realistischen Abmessungen, der an einer schwach befahrenen Verkehrsader steht. Auf den energetischen Aufwand und die Emissionen, die bei einer Verkehrsumlagerung oder einem Stau anfallen, wurde daher verzichtet. Als klimatische Bedingung wurde angenommen, dass der Pfeiler im Freien unter Dach steht. Mit der Annahme eines nicht direkt bewitterten Bauteils lässt sich das Diffusionsgesetz direkt anwenden, um daraus die Lebensdauer beim Schadensmechanismus Carbonatisierung abzuschätzen. Bei dem zu sanierenden Bauteil handelt es sich also um ein unbewohntes, der Carbonatisierung direkt ausgesetztes Stahlbetonbauteil. Durch die Tatsache, dass es unbewohnt ist, können auf energetische Betrachtungen, die während der Nutzung direkt an die Bausubstanz gebunden sind (wie etwa der Energieaufwand zur Heizung), verzichtet werden.

6 Abschätzung der Lebensdauer

Bei der Vorhersage der Lebensdauer des betrachteten Stahlbetonpfeilers wurde ausschliesslich der Einfluss auf den Carbonatisierungswiderstand berücksichtigt, der auf eine Nachbehandlung der Frischbetonoberfläche sowie auf den Einsatz von Verflüssiger zurückzuführen ist. Um diese Einflussgrössen mit in die Betrachtungen einbeziehen zu können, wurde auf Literaturquellen ([8],[9]) zurückgegriffen, wo im Rahmen von Langzeitversuchen an Aussenbauteilen die Carbonatisierungstiefen von Betonen mit unterschiedlichen w/z-Werten sowie variierender Dauer der Nachbehandlung aufgeführt werden.

In dieser Studie werden zwei Betonmischungen verglichen, die bei der Frischbetonkontrolle eine vergleichbare Verarbeitbarkeit aufzeigen, wobei jedoch

bei einer Mischung durch Zugabe von Verflüssiger der w/z-Wert gesenkt werden konnte. Ausser den Komponenten Wasser und Verflüssiger wurde die gleiche Betonzusammensetzung bei beiden Betonen angesetzt. Es handelt sich um einen Beton ohne Verflüssiger mit Wasserzementwert 0.55 (Verdichtungsmass 1.04, Konsistenz weich) und einen Beton mit 1.5 M-% Verflüssiger (sulfoniertes Melaminformaldehydkondensat) mit einem Wasserzementwert von 0.45 (Verdichtungsmass 1.07, Konsistenz weich). Diese Betone werden bezüglich ihres Carbonatisierungswiderstandes verglichen.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Lebensdauerabschätzung aufgeführt. Dabei dient in der Literatur ein Probekörper als Referenz, der während 7 Tagen nachbehandelt (d.h. unter Wasser gelagert) und anschliessend bei Laborklima (20°, 65 % rel. Luftfeuchte) dem Carbonatisieren ausgesetzt wurde. Das Laborklima entspricht den zum Carbonatisieren idealen klimatischen Bedingungen. In der vorliegenden Studie wurde zur Abschätzung der Lebensdauer sowohl der Fall einer nach Schweizer Norm geforderten Betonüberdeckung der Bewehrung von 3 cm als auch der Fall einer ungenügenden Überdeckung von 2 cm angesetzt.

In den Literaturdaten bezog sich die prozentuale Veränderung des Carbonatisierungswiderstandes im Vergleich zur Referenzprobe auf eine Betonmischung mit einem w/z-Wert von 0.6. Ausserdem war der Zementgehalt bei den w/z-Werten 0.45 und 0.55 nicht konstant, da bei den Probekörpern in der Literatur das Kriterium des gleichen Zementsteinvolumens angesetzt wurde. Für eine Abschätzung der Notwendigkeit einer Instandsetzung innerhalb der projizierten Lebensdauer eines Brückenpfeilers von 100 Jahren ist eine direkte Übertragung der Ergebnisse aus der Literatur durchaus zulässig.

Berücksichtigte Szenarien:

- Für den Beton mit w/z = 0.45 und Verflüssiger kann eine Instandsetzung wegen der hohen berechneten Lebensdauer ausgeschlossen werden. Allein berücksichtigt wird also die Herstellung des Pfeilers mitsamt Verflüssiger.
- Für den Beton mit w/z = 0.55 und ohne Verflüssiger ist bei ungenügender Be-

Tabelle 3: Zusammensetzung des Spritzbetons

w/z-Wert	0.43
Zementgehalt [kg/m ³]	500
Verflüssiger [M.-%]1	0.1
Acrylfaser [M.-%]1	0.1
Rückprall [%]	15

tonüberdeckung von 2 cm eine Instandsetzung vor Ablauf der geplanten Nutzungsdauer wahrscheinlich. In der Ökobilanz werden also die Energie- und Stoffflüsse eines Lebenszyklus mit einer Instandsetzung bei ungenügender Betonüberdeckung berechnet.

- Bei einer Betonüberdeckung von 3 cm ist eine Instandsetzung vor Ablauf der Nutzungsdauer nicht auszuschliessen. Ob eine solche Instandsetzungsmassnahme vorgenommen werden muss, hängt von Parametern wie dem Gehalt an Kohlendioxid in der Luft, der Betonqualität, der Qualität der Randzone und der klimatischen Bedingungen ab. In der Praxis lassen sich solche Fälle der Carbonatisierung trotz genügender Betonüberdeckung beobachten. Wegen dieser Unsicherheiten werden die Umweltbelastungen ebenfalls für einen Lebenszyklus mit einer Instandsetzungsmassnahme bei einer Betonüberdeckung von 3 cm berechnet.
- Um einen Vergleich mit der Instandsetzungsmassnahme bei 3 cm Überdeckung zu erlauben und gleichzeitig die ökologischen Folgen einer ungenügenden Qualität bei der Durchführung der Instandsetzungsmassnahme zu berücksichtigen, wurde der Fall einer doppelten Instandsetzung bei einer Betonüberdeckung von 2 cm ebenfalls in Betracht gezogen.
- Um den Einfluss einer sorgfältigen Nachbehandlung wenigstens annähernd erfassen zu können, wurde ein Lebenszyklus mit Pfeilerherstellung und dreitägiger Nachbehandlung durchgerechnet.

7 Szenarium Instandsetzung

Die Instandsetzungsmassnahme soll einen Fortschritt der Korrosion verhindern, so dass die Tragsicherheit des Bauwerks gewährleistet bleibt. Bei der im Rahmen dieser Studie geplanten Instandsetzungsmassnahme wird eine Instandsetzung im Schadensfall Carbonatisierung betrachtet, wobei zunächst die Bewehrung freigelegt und anschliessend eine Spritzbetonschicht aufgebracht wird. Im folgenden wird auf die einzelnen Instandsetzungsschritte eingegangen.

Erster Instandsetzungsschritt: Freilegen der Bewehrung

Um die Korrosion wirksam zu unterbinden, werden gewöhnlich die korrodierenden Stähle freigelegt. Dazu muss die gesamte Betonüberdeckung über den beschädigten Stählen abgetrennt werden. Der Abtrag erfolgt in der Regel mittels Wasserhöchstdruckanlagen. Hierbei wird Wasser unter hohem Druck auf die Betonoberfläche gespritzt. Zur Beschleunigung des Wassers ist Druckluft nötig, die gewöhnlich mittels eines Kompressors mit Dieselmotorantrieb erzeugt wird. Das mit hoher kinetischer Energie auf die Betonoberfläche auftref-

fende Wasser löst die Betonüberdeckung über den korrodierenden Stählen ab. Gewöhnlich wird hinter der Bewehrung noch zusätzlich 1 cm Beton abgetragen, um die Bewehrung ganzumfänglich freizulegen und die Korrosionsprodukte von der Stahloberfläche zu entfernen. Dadurch ist der Verbund mit der aufzutragenden Spritzbetonschicht gewährleistet [10].

Die Wasserhöchstdruckanlagen können manuell bedient werden, für eine flächige Instandsetzung, ist jedoch eine maschinelle Bedienung vorzuziehen.

Zweiter Instandsetzungsschritt: Vorbehandlung der zu beschichtenden Betonoberfläche

Ein trockener, saugfähiger Untergrund entzieht der frisch aufgetragenen Spritzbetonschicht teilweise das Anmachwasser. Durch diese Reduktion wird die Hydratation des Zementes gebremst und so die Qualität des Spritzbetons stark beeinträchtigt. Um das zu verhindern, wird die zu beschichtende Oberfläche vorbehandelt, d.h. drucklos mit Wasser berieselt [11].

Dritter Instandsetzungsschritt: Aufbringen einer Spritzbetonschicht

Durch das Aufbringen einer Spritzbetonschicht werden einerseits die gereinigten Bewehrungsstähle wieder in ein alkalisches Milieu eingebettet und so vor erneuter Korrosion geschützt. Andererseits werden die ursprünglichen, statisch bedingten Abmessungen des Bauwerks wiederhergestellt.

Für diese Studie wurde die Methode des Nassspritzverfahrens wegen der im Vergleich zum Trockenspritzverfahren geringeren Staubentwicklung ausgewählt [11]. Begründen lässt sich diese Wahl durch die besseren Arbeitsbedingungen. Um den Verbund zwischen der aufgetragenen Betonschicht und dem Untergrund zu verbessern, werden Polymerdispersionen eingesetzt. Ebenfalls berücksichtigt wird ein geringer Zusatz von Verflüssiger, der eine genügende Pumpbarkeit des Betons gewährleisten soll. Die Spritzbetonmischung, wie sie in der Ökobilanz angesetzt wird, ist in Tabelle 3 kurz angegeben. Ebenfalls berücksichtigt wird der Rückprall, der beim Spritzen nicht haften bleibt und daher als zu entsorgender Abfall anfällt.

Zur Begrenzung der Schwindrissbildung ist eine Armierung des Spritzbetons mit einem verzinkten Stahlnetz vorgesehen.

Vierter Instandsetzungsschritt: Nachbehandlung

Da der Spritzbeton wegen des ungünstigen Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen zu raschem Austrocknen neigt, ist eine Nachbehandlung zur Gewährleistung der Anforderungen bezüglich der Dauerhaftigkeit und Festigkeit der Beschichtung besonders wichtig. Der junge Beton weist kurz nach dem Anmachen eine geringe Zugfestigkeit und eine minimale Bruchdehnung auf, so dass

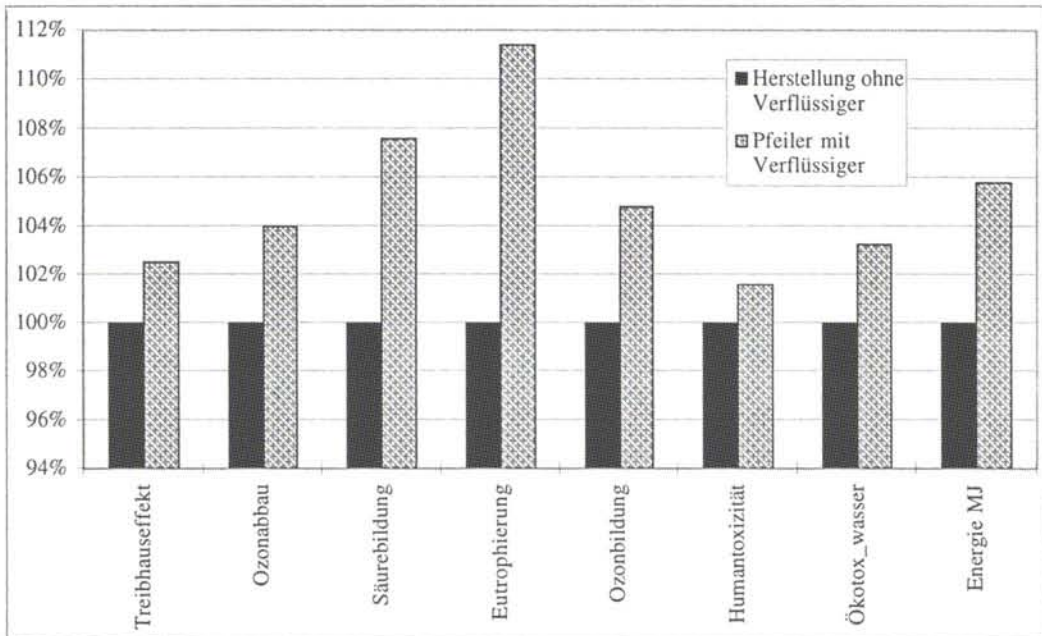


Bild 2: Vergleich der Herstellung eines Pfeilers mit Verflüssiger und ohne Verflüssiger

er die Eigenspannungen infolge des Austrocknen der Betonoberfläche nicht aufnehmen kann. Ein Ziel der Nachbehandlung ist es, die Anzahl an Schwindrissen, die beim frühzeitigen Austrocknen des jungen, unbehandelten Betons unvermeidlich auftreten, zu minimieren. Es soll weiterhin eine bestmögliche Hydratation ermöglicht werden. Wie bereits die Vorbehandlung erfolgt die Nachbehandlung ebenfalls durch Berieseln der Betonoberfläche mit Wasser [11]. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für einen hohen Widerstand gegen den Eintritt von Atmosphärien und betonaggressiven Verbindungen.

8 Ökologische Einschätzung der unterschiedlichen Lebenszyklen: Vorgehen und Ergebnisse

8.1 Vorgehen

Zur Vervollständigung der Sachbilanz sowie zur Erstellung der Wirkungsbilanz wurde auf das Computerprogramm EMIS (Environmental Management and Information System) der Firma Carbotech zurückgegriffen. In der Datenbank des Programms EMIS sind bereits eine grosse Auswahl von Prozessen gespeichert. Die Emissionen, die bei diesen Prozessen anfallen, wurden von der EMPA bzw. der ESU-Gruppe am Institut für Energietechnik der ETH Zürich erfasst. Sie stel-

len die Datenbasis der Sachbilanz dar. Wird die Menge eines verwendeten Stoffes (z.B.: bei der Dieselerbrennung die Menge an verbrauchtem Diesel) angegeben, so greift das Programm auf die Datenbank zurück und berechnet die entsprechenden Emissionen. Gewöhnlich sind die in der Datenbank verfügbaren Prozesse bereits in Form von Modulen erfasst, d.h. als Summenprozesse, die neben der aus dem eigentlichen Prozess herrührenden Belastung alle vorgelagerten Stufen (wie etwa die Gewinnung und Aufbereitung der Rohstoffe) mitberücksichtigen.

Bei der Zusammenstellung eines Lebenszyklus lassen sich die einzelnen Module (oder Summenprozesse) verknüpfen und somit zu neuen Modulen zusammensetzen. So ist z.B. das Modul Wasserhöchstdruckanlage der Instandsetzung ein zusammengesetztes Modul aus den Modulen Wasser und Dieselerbrennung. Durch die systematische Verknüpfung der einzelnen Module oder Prozesse entsteht ein sogenannter Prozessbaum. Dadurch dass man die einzelnen Stufen eines solchen Prozessbaumes zurückverfolgt, kann man für einen gegebenen Stoff oder Energieträger bis zum Rohstoff zurückgehen und den Aufwand und die damit verbundenen Umwelteinwirkungen jedes Umwandlungsprozesses, vom Rohstoff bis hin zum fertigen Produkt, erfassen.

Die Emissionen werden von dem Programm EMIS aufgrund des gewählten Modells (in dieser Studie aufgrund des Modells des CML Leiden) beurteilt. Die zur Bestimmung der Einwirkungen auf die Umwelt nötigen Umrechnungsfaktoren (d.h. das spezifische Wirkungspotential der einzelnen Substanzen) sind bereits in der Datenbank enthalten. Praktisch gesehen werden also für einen neuen Prozess die einzelnen Betriebsstoffe, Energieträger, Abfälle und eventuelle prozessspezifische Emissionen in das Computerprogramm eingegeben und (insofern die Daten in der Datenbank enthalten sind) sogleich auf die Wirkungskategorien umgerechnet.

Im allgemeinen ist der Aufwand zur Erstellung oder Wartung der Infrastruktur (z.B. die Produktionsmaschinen und Gebäude) zur Produktion eines Stoffes nicht berücksichtigt. In Studien der ETH [13] bezüglich der ökologischen Relevanz der Infrastruktur hat sich herausgestellt, dass durch die Vernachlässigung der Infrastruktur die Umwelteinwirkungen um weniger als 5 % unterschätzt werden. Aus diesem Grunde wird die aufwendige Erfassung der Herstellung der Geräte und Installationen gegenwärtig noch vernachlässigt. Nur im Modul Strom (d.h. den Umweltauswirkungen, die bei der Stromerzeugung anfallen), ist die oft sehr aufwendige Infrastruktur bereits mitberücksichtigt. Beim schweizerischen Strommix ist also anteilmässig der Aufwand zur Erstellung des Kern- bzw. Wasserkraftwerkes im Modul Strom berücksichtigt.

Zu bemerken ist, dass die eingegebenen Module ausschliesslich die Herstellung der Stoffe (Prozessenergie inkl. Heizwert) berücksichtigen. Die Einwirkungen, die während der Nutzung oder Entsorgung anfallen (wie beispielsweise eine

Auslaugung des Verflüssigers aus dem Beton (im erstellten Pfeiler, recycelt oder deponiert)), müssen getrennt betrachtet werden. Sie wurden in dieser Studie aufgrund der Ergebnisse von [2] zunächst vernachlässigt. Es wäre jedoch von Interesse, in einem späteren Schritt genauer auf die Auswirkungen solcher Auslaugungen im Rahmen der Ökobilanz einzugehen.

8.2 Modul Pfeilerherstellung

8.2.1 Ökologische Auswirkungen infolge des Einsatzes von Verflüssiger

Für einen Betonpfeiler, hergestellt mit Verflüssiger (1.5 M.-% sulfoniertes Melaminformaldehydcondensat bezogen auf das Zementgewicht) oder ohne Verflüssiger, wurden die ökologischen Auswirkungen mit Hilfe des Leidener Modells bewertet. Die Ergebnisse sind in Bild 2 dargestellt. Für die folgende Diskussion werden nur Umweltparameter betrachtet, die beim Einsatz von Verflüssiger um mehr als 5 % ansteigen.

- Eutrophierung:

Wegen des Einsatzes von Verflüssiger kann ein Anstieg der Eutrophierung um fast 12 % beobachtet werden, was konkret einer Freisetzung von 4 g Phosphat pro Quadratmeter Mantelfläche entspricht. Dieser Anstieg kommt aus der Herstellung der Verflüssiger, und zwar hauptsächlich vom Melamin. Die Hauptkomponente des Melamins ist Harnstoff. Die Eutrophierung lässt sich also auf stickstoffhaltige Emissionen (Ammoniak) bei der Herstellung von Harnstoff zurückzuführen.

- Säurebildung

Die Versauerung nimmt durch den Einsatz von Verflüssiger um fast 8 % zu. Dies ist ebenfalls auf die, bei der Herstellung von Harnstoff anfallenden Emissionen von Ammoniak zurückzuführen. Die Versauerung durch den Einsatz von Verflüssiger entspricht etwa der Wirkung von 30 g Schwefeldioxid pro Quadratmeter.

- Energie

In der Wirkungskategorie Energie wird sowohl die Prozessenergie des spezifischen Prozesses als auch die Energie aus den vorgelagerten Prozessen im Lebenszyklus der eingesetzten Stoffe erfasst.

Die Energiebilanz erhöht sich durch den Einsatz von Verflüssiger um fast 6 %, d.h. 69 MJ pro Quadratmeter Mantelfläche. Der Aufwand des geringen Anteils an Verflüssiger ist also verglichen mit der Herstellung des gesamten Pfeilers durchaus nicht vernachlässigbar. Zusätzlich zu der aufgeführten Prozessenergie müsste der Vollständigkeit halber noch ein Energieaufwand zur Sulfonierung in Rechnung gestellt werden. Die entsprechenden Daten waren jedoch zu diesem Zeitpunkt nicht verfügbar. Es kann vermutlich davon ausgegangen

werden, dass dieser hier vernachlässigte Energieaufwand insgesamt nur einen geringen Einfluss haben wird. Auf den zusätzlichen Energieverbrauch infolge des Einsatzes von Verflüssiger wirkt sich besonders die energieintensive Herstellung von Harnstoff mit Kohlendioxid und Ammoniak als Ausgangskomponenten aus.

- Ozonabbau

Der Einsatz von Verflüssiger bewirkt eine Erhöhung des Ozonabbaus um etwa 5 %, was einer Emission von etwa 0.55 mg CFC-11 pro Quadratmeter Mantelfläche entspricht. Dieser Effekt ist auf die Emissionen bei den energieintensiven Verfahren zur Herstellung von Methanol (Ausgangsstoff des Formaldehyds) und von Harnstoff (Ausgangsprodukt des Melamins) zurückzuführen.

8.2.2 Ökologische Auswirkungen infolge einer Nachbehandlung der Betonoberfläche

Die Umweltauswirkungen einer Nachbehandlung wurden ebenfalls untersucht. Die verwendeten Module zur Abwasserreinigung sind jedoch nur bedingt anwendbar. Der hohe pH-Wert und der Anteil an Feinmaterialien konnte nicht berücksichtigt werden. Aus der Untersuchung ergab sich, dass der Einfluss der Nachbehandlung auf die Umweltauswirkungen bei dem angewandten Modul so gering waren, dass die Nachbehandlung bei einer Gegenüberstellung mit den Um-

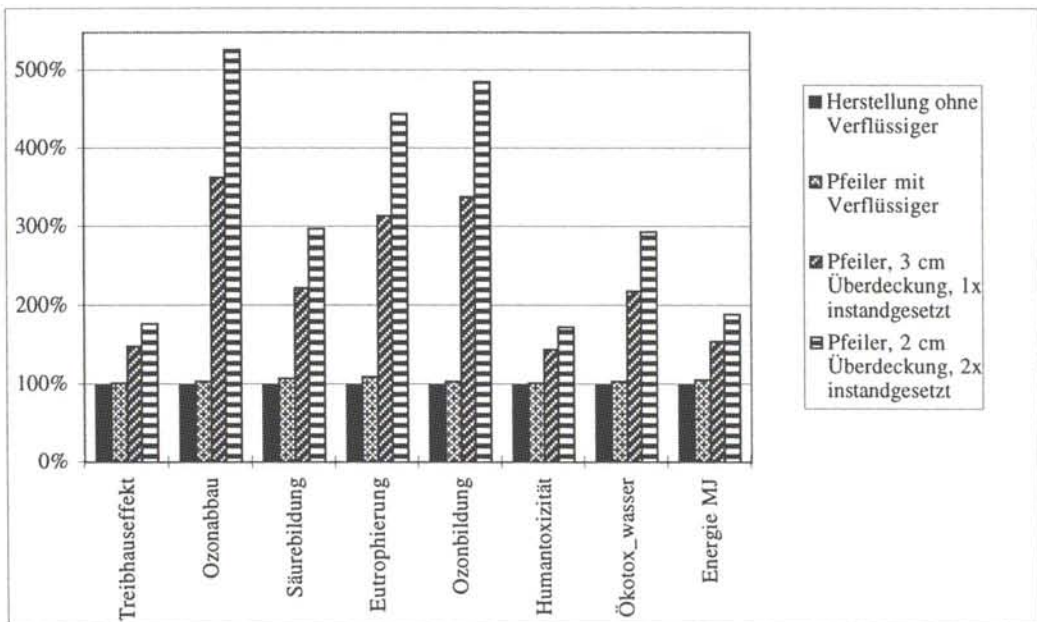


Bild 3: Vergleich der unterschiedlichen Lebenszyklen

welteinflüssen aus der Pfeilerherstellung in der Grössenordnung eines Zehntel Promille lag. Obwohl eine objektbezogenere Untersuchung wahrscheinlich nicht in gleichem Masse günstig ausfallen würde, kann festgehalten werden, dass der hohe pH-Wert sich wahrscheinlich beim Mischen mit dem sauren Siedlungsabwasser eher günstig auswirken wird und die anorganischen Feinanteile ohne grösseren Energieaufwand, sei es über Filter oder Absetzbecken, aus dem Abwasser gefiltert werden können.

Diese Ergebnisse und der positive Einfluss einer Nachbehandlung auf die Lebensdauer zeigen, dass der Einfluss einer sorgfältigen Nachbehandlung das Risiko einer Instandsetzung stark reduziert, und gleichzeitig nur geringe Umweltbeeinträchtigungen zu verzeichnen sind. Dies hebt die grosse ökonomische, aber auch ökologische Bedeutung einer ausreichenden Nachbehandlung hervor.

8.3 Modul Pfeilerherstellung mit Instandsetzung

Den Untersuchungen zugrundeliegend ist der Fall einer Instandsetzung bei einer Betonüberdeckung von 3 cm. Wie bei der Lebensdauervorhersage festgestellt wurde, besteht ein gewisses Risiko für die Notwendigkeit einer solchen Massnahme. Ob sie auch tatsächlich durchgeführt werden muss, ist jedoch bei gegebenen klimatischen Randbedingungen massgeblich von der Betonqualität in der Randzone abhängig. Neben der Herstellung und Instandsetzung eines Pfeilers ohne Verflüssiger bei einer Betonüberdeckung von 3 cm ist in Bild 3 die doppelte Instandsetzung bei ungenügender Überdeckung von 2 cm dargestellt. Es zeigt sich, dass eine ungenügende Betonqualität nicht nur bei der Pfeilerherstellung, sondern ebenfalls bei der Herstellung einer Spritzbetonbeschichtung als Sanierungsmassnahme ökologische Konsequenzen mit sich zieht. Die Sicherstellung einer qualitativ guten Instandsetzung ist also von besonderer Wichtigkeit.

Folgende Erläuterungen beziehen sich ausschliesslich auf die Variante der Pfeilerherstellung mit einer Instandsetzung bei 3 cm Betonüberdeckung. Die Umweltbelastungen haben jedoch bei allen Varianten den gleichen Ursprung.

- Treibhauseffekt

Etwa die Hälfte der Einwirkung bezüglich Treibhauseffekt stammt von dem Einsatz der Wasserhöchstdruckanlage, die andere Hälfte aus der Zementherstellung. Bei der Verbrennung von Diesel fallen Treibhausgase und vor allem auch CO_2 an. Die Emissionen entsprechen etwa 58 kg CO_2 pro Quadratmeter Mantelfläche.

Diese Emissionen aus der Instandsetzung entsprechen der Hälfte der Emissionen an Treibhausgasen, die bei der Pfeilerherstellung anfallen.

- Ozonabbau

Der Ozonabbau kommt zu 90 % aus der Verbrennung des Diesels im Motor der

Wasserhöchstdruckanlage. Besonders das reaktionsträge Lachgas, das bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe anfällt, ist für das Ozon der Stratosphäre gefährlich. Die Emissionen pro Quadratmeter Mantelfläche infolge Dieselerbrennung entsprechen etwa 34 mg CFC-11, d.h. fast dem dreifachen der Emissionen aus der Pfeilerherstellung alleine.

- Säurebildung

Die Versauerung stammt ebenfalls massgeblich, d.h. zu etwa 80 % vom Diesel der Wasserhöchstdruckanlage und dem bei der Verbrennung entstehenden Stickdioxid. Die Säurebildung der Instandsetzung ist etwa genauso gross wie bei der Pfeilerherstellung und entspricht der Bildung von 0.5 kg Schwefelsäure pro Quadratmeter Mantelfläche.

- Eutrophierung

Die Überdüngung aus der Instandsetzung ist etwa doppelt so gross wie die aus der Pfeilerherstellung. Die Emissionen aus der Instandsetzung entsprechen etwa 76 g Phosphat pro Quadratmeter Mantelfläche. Etwa 90 % davon sind auf die Freisetzung von Stickoxiden bei der Dieselerbrennung im Motor der Wasserhöchstdruckanlage zurückzuführen.

- Ozonbildung

Das Ozonerzeugungspotential aus der Instandsetzung ist doppelt so gross wie das aus der Pfeilerherstellung. Die Bildung an Smoggasen entspricht etwa der Bildung von 550 g Ozon pro Quadratmeter Mantelfläche. Etwa 90 % davon kommen von den Verbrennungsgasen aus der Dieselerbrennung im Motor der Wasserhöchstdruckanlage.

- Humantoxizität

Bei der Humantoxizität handelt es sich um den am schwierigsten zu beurteilenden Faktor im Leidener Modell. Toxikologische Substanzen entstehen aus der Dieselerbrennung, aber etwa genausoviel ist auf die Zementherstellung beim Spritzbeton zurückzuführen.

Der für die Instandsetzung errechnete Wert entspricht ungefähr der Hälfte der Auswirkungen aus der Pfeilerherstellung. Der Wert ist nur schwer zu interpretieren. Es wird deshalb auch hier nicht weiter darauf eingegangen. Es kann jedoch festgestellt werden, dass eine Instandsetzungsmassnahme eine Erhöhung der Gefährdung der menschlichen Gesundheit bedeutet.

- Ökotoxizität

Die Ökotoxizität des Wassers wird über zum Teil nicht wissenschaftlich fundierte Grenzwerte bestimmt. Eine Interpretation der Werte der Ökotoxizität ist daher schwierig. Gesagt werden kann jedenfalls, dass die Gefährdung des Wassers durch die Emissionen bei einer Instandsetzung (hauptsächlich aus der Dieselerbrennung) etwa in der gleichen Grössenordnung liegt, wie die Auswirkungen aus der Pfeilerherstellung.

- Energie

Der Energieaufwand der Instandsetzung beträgt etwa 653 MJ pro Quadratmeter Mantelfläche, was etwa der Hälfte des Energiebedarfs für die Pfeilerherstellung entspricht. Die Wasserhöchstdruckanlage verbraucht mit 70 % den grössten Anteil der Energie.

Der Fall einer Instandsetzung bei einer Betonüberdeckung von 2 cm wurde ebenfalls untersucht. Eine solche Instandsetzung wird gemäss der abgeschätzten Lebensdauer mit grosser Wahrscheinlichkeit notwendig sein. Die ökologischen Auswirkungen sind immer noch signifikant und liegen nur geringfügig (20 bis 30 %) unter der Umweltbelastung bei einer Instandsetzungsmassnahme bei einer Betonüberdeckung von 3 cm. Die Diskussion bleibt demzufolge davon unangetastet.

8.4 Instandsetzungsalternativen

Die meisten Umweltbeeinträchtigungen sind auf den Dieserverbrauch der Wasserhöchstdruckanlage beim Freilegen der Bewehrung zurückzuführen. Die Leistung der Wasserhöchstdruckanlage scheint also ein sehr wichtiger Einflussfaktor zu sein. Bei der Variation dieses Faktors stellte sich heraus, dass die Umweltauswirkungen etwa proportional zur Änderung der Leistung sind, während sie auf eine Änderung des Zementgehaltes im Spritzbeton bedeutend weniger ausgeprägt reagieren.

Ebenfalls betrachtet wurde eine Instandsetzungsmassnahme mit Bewehrungsbehandlung. Eine solche Bewehrungsbehandlung setzt sich aus einem Ablösen der Korrosionsprodukte von der Stahloberfläche mittels Sandstrahlanlage (mit Dieselmotor als Antrieb des Kompressors) und einer Bewehrungsbeschichtung, in der Regel mit Epoxidharz, zusammen. Es hat sich herausgestellt, dass eine solche Bewehrungsbehandlung die Umweltauswirkungen bezüglich jeder Wirkungskategorie um wenigstens 25 % erhöht. Der Hauptanteil dieser ökologischen Auswirkungen ist auf die Dieselverbrennung im Motor der Sandstrahlanlage zurückzuführen.

Die meisten ökologischen Folgen stammen aus der Dieselverbrennung im Motor des Kompressors der Wasserhöchstdruckanlage. Um eine objektivere Darstellung der Umwelteinwirkungen zu erzielen, wurde in einem neuen Ansatz anstelle des Dieselmotors ein Elektromotor als Antrieb für den Kompressor angesetzt. Der Strombedarf wurde über die unterschiedlichen Wirkungsgrade für den Elektro- und den Dieselmotor abgeschätzt. Die Energieversorgung über elektrischen Strom ist bei dem schweizerischen Strommix mit ca. 56 % aus Wasserkraftwerken, zu ca. 41 % aus Kernkraftwerken sicher die Variante, die am wenigsten Emissionen in die Umwelt freigibt. Bei der Variante einer Instandsetzung mit Stromversorgung bei ungenügender Betonüberdeckung zeigt es sich, dass trotz

dieser idealisierten Annahmen bezüglich der Energieversorgung dieser Variante mit einer Zugabe von Verflüssiger bei der Herstellung eines Pfeilers global gesehen als ökologischer ist als die Herstellung ohne Verflüssiger mit später nötiger Instandsetzung. Die bleibende Umweltbeeinträchtigung liegt im Durchschnitt knapp 20 % über der Herstellung eines Stahlbetonpfeilers mit Verflüssiger.

Praktisch lässt sich dieses Ergebnis aber nur bedingt umsetzen. Der Ersatz des Diesels durch elektrischen Strom als Energieträger setzt voraus, dass auf der Baustelle die Möglichkeit eines Strombezuges gegeben ist. Eine indirekte Stromversorgung über Batterien würde wegen der relativ geringen Lebensdauer der Batterien und deren aufwendiger Entsorgung ökologisch gesehen durchaus ungünstiger ausfallen.

9 Schlussfolgerungen

- Mit einer ausreichenden Datenbasis ist es möglich, eine Sach- und Wirkungsbilanz für eine Instandsetzung im Rahmen einer Ökobilanz und so neben einer ökonomischen ebenfalls eine ökologische Optimierung durchzuführen.
- Der Einsatz eines Verflüssigers bei gleicher Verarbeitbarkeit bewirkt eine Reduktion des w/z-Wertes und somit eine Erhöhung des Carbonatisierungswiderstandes und der Lebensdauer eines Bauteils aus Stahlbeton.
- Es hat sich gezeigt, dass aufgrund der erhöhten Lebensdauer eines Stahlbetonbauteils und der dadurch möglichen Vermeidung einer Instandsetzung die Zugabe von Betonverflüssiger in den Frischbeton ökologisch sinnvoll ist.
- Eine gründliche Nachbehandlung zur Verbesserung der Betonqualität wirkt sich positiv auf die Umwelt aus.
- Eine qualitativ gut durchgeführte Instandsetzung ist ökologisch sinnvoll, da sie es ermöglicht, eine eventuell sonst notwendige zweite Instandsetzung zu vermeiden.
- Eine Qualitätskontrolle, die die ausreichende Überdeckung der Bewehrung sicherstellt, erlaubt es, neben der Erfüllung der technischen Anforderungen auch die ökologische Auswirkungen des Bauteils zu beurteilen.
- Die Art der Energiegewinnung übt einen grossen Einfluss auf die Resultate der Sach- und Wirkungsbilanz aus.

10 Ausblick

Die genauere Untersuchung einiger, für die ganzheitliche Betrachtung der Umweltproblematik bei der Instandsetzung wichtiger Aspekte ist im Zusammenhang

mit dieser Studie von Interesse.

- Die Entsorgung eines Bauteils wurde in dieser Studie wegen unzureichender Datenbasis vernachlässigt. Es wäre sinnvoll, die beim Recycling von Beton mit Verflüssiger auftretenden Emissionen bezüglich ihrer Wirkung den spezifischen Wirkungskategorien zuzuordnen und ihre Wirkung abzuschätzen.
- Neben der Instandsetzungsmassnahme mit Spritzbetonbeschichtung gibt es noch eine Anzahl anderer Instandsetzungsmassnahmen wie oberflächentechnologische Massnahmen (Hydrophobierung, Beschichtung), die ebenfalls bezüglich ihrer ökologischen Auswirkungen analysiert werden können. Oftmals ist das Ausmass des Schadens zum Zeitpunkt der Instandsetzung massgebend für die Wahl der Instandsetzungsmassnahme. Es wäre somit möglich, den sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvollsten Zeitpunkt einer Instandsetzung festzulegen.
- Es ist ebenfalls möglich, die Betrachtungen bezüglich der Energie- und Stoffflüsse auf andere Betonzusatzmittel wie Luftporenbildner und Betonzusatzstoffe wie Flugaschen, Hochofenschlacke und Silica Fume zu übertragen, und so eine ökologische Optimierung der Betonzusammensetzung bei der Herstellung zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- 1 Spanka, G.: *Umweltgefährdungspotential von Betonzusatzmitteln und -stoffen: Konsequenzen für das Recycling*; Fachveranstaltung 955 141 : Bauchemie, Umwelt kontra Bautechnik; Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweizerischen Zementindustrie TFB (1995)
- 2 Gälli, R., G. Kiayias: *Environmental Impact of Superplasticizers*; Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, **2**, Heft **5**, S. 427-448 (1996)
- 3 Heijungs, R. et al.: *Environmental Life Cycle Assessment Of Products*, Guide, National Reuse of Waste Research Programme NOH, Centrum voor Milieukunde, Leiden (CML), The Netherlands (1992)
- 4 Beetstra, F.: *Building Related Environmental Diagnoses*; HERON, Vol. 41 **3** (1996)
- 5 Hergenröder, M.: *Zur statistischen Instandsetzungsplanung für bestehende Betonbauwerks bei Karbonatisierung des Betons und möglicher Korrosion der Bewehrung*, Berichte aus dem konstruktiven Ingenieurbau, TU München (1992)

- 6 Gerdes, A.: *Wechselwirkung zementgebundener Werkstoffe mit Wasser*; in F.H.Wittmann und A.Gerdes (Hrsg), Zementgebundene Beschichtungen in Trinkwasserbehältern, WTA Schriftreihe, Heft 12, S. 9-24 (1996)
- 7 Reul, H.: *Handbuch der Bauchemie, Einführung in die Grundlagen: Rohstoffe, Rezepturen*; Verlag für chemische Industrie H.Ziolkowsky KG, Augsburg, S.54-65 (1991)
- 8 Wierig, H.-J.: *Longtime Studies On The Carbonation Of Concrete Under Normal Outdoor Exposure*, RILEM Seminar On The Durability Of Concrete Structures Under Normal Outdoor Exposure, Hannover, 26th-29th March, S. 239-249 (1984)
- 9 Nürnberger, U.: *Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen*, Bauverlag, Wiesbaden, S. 348-349
- 10 Wolfseher, R.: *Die Sanierung von Stahlbetonbauten*, Baufachverlag, Dietikon (1994)
- 11 Teichert, P.: *Spritzbeton*, LAICH SA, Avegno (1991)
- 12 Kipping, S., Lunk, P.: Pers. Mitteilung, MBT, Zürich (1996)
- 13 Frischknecht, R., Hofstetter, P., Knöpfel, I., Ménard M.: *Relevanz der Infrastruktur in Ökobilanzen*; Untersuchungen anhand der ökoinventare für Energiesysteme; Bericht im Auftrag der EMPA St.Gallen und IVOK ETH Zürich; Labor für Energiesysteme der ETH Zürich (1995)